

郭文冰, 赵奋成, 钟岁英, 等. 湿地松半同胞家系对轮伐中期追肥的生长响应[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 90-95.

湿地松半同胞家系对轮伐中期追肥的生长响应

郭文冰¹, 赵奋成¹, 钟岁英², 邓乐平², 谭志强²,
容仁立³, 李 振¹, 李义良¹, 吴惠姗¹

(1 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520;
2 台山市红岭种子园, 广东 江门 529223; 3 台山市林业局, 广东 台山 529200)

摘要:【目的】分析轮伐中期施肥处理对湿地松 *Pinus elliottii* 半同胞家系生长的影响, 比较磷肥与石灰的肥效差异。【方法】对 13 年生的湿地松半同胞子代测定林设置氮钾(对照)、氮钾 + 钙镁磷肥、氮钾 + 石灰 3 种施肥处理, 分析了土壤和针叶的养分以及湿地松生长性状。【结果】轮伐中期施肥对株高、胸径及单株材积均有显著性影响, 处理与家系的交互效应不显著。与对照相比, 钙镁磷肥和石灰均促进了株高的生长, 分别提高 37.1% 和 29.5%; 石灰可以促进材积增量, 与对照相比, 材积增量提高了 22.5%, 且石灰处理的胸径增长高于钙镁磷肥处理。【结论】轮伐中期可通过追施氮钾 + 石灰增加湿地松出材量; 石灰对湿地松生长的促进可能与磷有关, 与钙无关。

关键词:湿地松; 轮伐中期; 肥效; 石灰; 裂区设计; 生长性状
中图分类号:S725.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2017)01-0090-06

Growth response of *Pinus elliottii* open pollinated families to mid-rotation fertilization

GUO Wenbing¹, ZHAO Fencheng¹, ZHONG Suiying², DENG Leping², TAN Zhiqiang²,
RONG Renli³, LI Zhen¹, LI Yiliang¹, WU Huishan¹

(1 Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 2 Taishan Hongling Seed Orchard, Jiangmen 529223, China; 3 Forestry Bureau of Taishan, Jiangmen 529200, China)

Abstract:【Objective】To study the effect of mid-rotation fertilization on the growth of *Pinus elliottii* open pollinated families, and compare the differences of P fertilizer and liming. 【Method】Three different treatments (NK as control, NK + Ca-Mg-P, NK + liming) were conducted in a 13-year *P. elliottii* open pollinated progeny test stand. The growth characteristics of *P. elliottii* were examined before and after fertilization, and the nutrition contents were analyzed in soil and needle. 【Result】Mid-rotation fertilization had a significant effect on the increments of height, DBH and volume, while the interaction effect between family and treatment was not significant. Compared to NK treatment, NK + Ca-Mg-P and NK + liming significantly increased the height increment by 37.1% and 29.5% respectively, while the latter increased the volume increment by 22.5%. Meanwhile, the DBH increment of NK + liming treatment was higher than that of NK + Ca-Mg-P treatment. 【Conclusion】Liming with NK fertilizers can increase the timber yield of *P. elliottii*. The promotive effect of liming on growth of *P. elliottii* might be related to P instead of Ca.

Key words:*Pinus elliottii*; mid-rotation; fertilizer effect; liming; split-plot design; growth trait

湿地松 *Pinus elliottii* Engelm. 原产于美国东南部, 20 世纪 30 年代引入我国^[1], 成为我国重要的材脂两用工业原料林树种。目前湿地松种植面积达到 200 万 hm^2 , 分布范围在北纬 $18^{\circ}30'$ ~ $35^{\circ}50'$ 之间。前人对湿地松的施肥方案研究多集中在氮磷钾元素, 一般认为, 磷是限制湿地松生长的重要元素, 在缺磷土壤中需添加磷肥作为基肥^[2-3]。在轮伐中期, 湿地松对特定施肥配方也有肥效反应, 澳大利亚亚热带地区追施磷肥^[4]、美国东南部追施氮磷^[2-3]、中国广东滨海沙地追施氮磷钾^[5] 均能促进湿地松生长。石灰是酸性土壤的改良剂, 施用石灰不但可增加土壤钙浓度, 还具有调节土壤 pH、活化土壤磷的作用。Kyle 等^[6] 研究了火炬松 *Pinus taeda* L. 对轮伐中期施肥的反应, 发现 9 年生的火炬松追施 NP + 石灰可在 33 年生时增加 22% ~ 27% 的材积, 而追施 P 或 NP 则无肥效反应。Wei 等^[7] 研究了 NPK、石灰与硼砂对湿地松松脂产量的影响, 发现石灰对松脂产量有显著的促进作用, 而 NPK 或硼处理则无显著影响。钙是植物生长的必需营养元素之一, 对植物的生长有关键调控作用^[6]。然而, 田间试验中极少发现缺钙的现象^[8]。本文以氮钾处理为对照, 在氮钾基础上添加钙镁磷肥或石灰, 对广东省台山市的一块 13 年生湿地松子代测定林开展施肥试验, 研究了施用石灰对轮伐中期湿地松生长的影响, 并分析了湿地松生长的养分调控因子。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广东省台山市, 北纬 $22^{\circ}10'$, 东经 $112^{\circ}49'$, 海拔 30 m, 年平均气温约 22°C , 年平均降水量约 1 808 mm。土壤为花岗岩分化的酸性红壤。试验林为包含 23 个湿地松半同胞家系的子代测定林, 造林时间为 2000 年春季, 株行距为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$, 造林时每株施 250 g 过磷酸钙 [$w(\text{P}_2\text{O}_5) = 12\%$] 作为基肥。2013 年 9 月, 对该试验林布置施肥试验, 处理前在 3 个地块取 0 ~ 30 cm 的土样, 每个地块取 5 个混合样, 进行土壤理化性状分析。土壤 pH 采用电位法(提取剂与土壤比例为 2.5:1.0); 土壤有机质含量测定采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法; 土壤全氮含量测定采用硫酸加速剂消煮-定氮仪蒸馏法; 土壤全磷含量测定采用酸熔-钼蓝比色法; 土壤全钾含量测定采用碱熔-火焰光度法; 土壤碱解氮含量测定采用氢氧化钠分解扩散法; 土壤有效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法; 土壤速效钾含量测定采用乙酸铵交换-火焰光度法; 土壤交换性钙、交换性镁采用乙酸铵交换-原子吸收光

谱法; 土壤有效铜、有效锌采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)提取-原子吸收光谱法; 土壤有效硼测定采用热水浸提-姜黄素比色法; 土壤阳离子交换量测定采用乙酸铵交换、乙醇清洗、氧化镁蒸馏法; 土壤质地测定采用比重计法。分析结果如下: pH 4.31 ± 0.04 , 有机质 (22.67 ± 2.87) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 (0.88 ± 0.08) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 (0.32 ± 0.01) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 (1.57 ± 0.10) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 (76.11 ± 5.98) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 (0.69 ± 0.14) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 (12.95 ± 2.60) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性钙 (48.84 ± 15.89) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性镁 (5.88 ± 2.00) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效铜 (0.30 ± 0.07) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效锌 (0.76 ± 0.19) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效硼 (0.36 ± 0.04) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阳离子交换量 (7.64 ± 0.44) $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤质地为壤土。

1.2 试验设计

施肥试验于 2013 年 11 月开展, 处理前参试材料平均株高为 (10.52 ± 1.35) m, 胸径为 (14.92 ± 2.91) cm, 单株材积为 (0.099 ± 0.049) m^3 。试验采用完全随机裂区设计, 以施肥处理为主区, 每个处理设 4 个重复, 家系为副区, 每个副区内包含 2 ~ 4 个单株。各处理间设 1 行缓冲带。

试验林人工除杂后, 每株沿滴水线挖一个弧形施肥沟, 均匀将化肥按设计量施入后覆土。设 3 个施肥处理, 处理 T1(对照) 为氮钾肥, 每株施入 200 g 尿素 [$w(\text{N}) = 46\%$] + 50 g 氯化钾 [$w(\text{K}_2\text{O}) = 60\%$]; 处理 T2 在氮钾基础上添加钙镁磷肥, 每株施入 200 g 尿素 + 50 g 氯化钾 + 400 g 钙镁磷肥 [$w(\text{P}_2\text{O}_5) = 12\%$]; 处理 T3 在氮钾基础上添加石灰, 每株添加 200 g 尿素 + 50 g 氯化钾 + 400 g 石灰 [$w(\text{Ca}(\text{OH})_2 = 90\%$)]。

1.3 数据获取

在处理前(2013 年 11 月)和处理后(2014 年 11 月)进行单株生长调查, 包括株高和 1.3 m 处的胸径。株高采用铝制测量杆直接测量, 胸径用胸径尺测量^[9]。单株材积(V)计算公式^[11]:

$$V = f \times \pi / 4 \times \text{DBH}^2 \times h,$$

式中, π 为圆周率, f 为形数 ($f = 0.5$), DBH 为胸径, h 为株高。

2014 年 11 月采集土壤样品, 在 0 ~ 30 cm 土层范围内, 按比例采集并混合 1 kg 以上样品, 风干, 每个处理 3 个重复, 分析土壤 pH、阳离子交换量、以及有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙含量。

处理前的针叶样品包括 22 个家系材料, 每个家系 4 个重复, 每个重复随机选取 2 个单株, 混合 4 个

重复的材料进行养分测定。处理后的针叶样品选自 2、4 与 16 这 3 个家系的单株,每个家系采集 3 个单株,进行养分测定。采集树冠上部 1/3 处的枝条中部针叶作为样品,100 ℃杀青 30 min、75 ℃烘干至恒质量,硫酸双氧水煮沸后,测定植物全氮、全磷、全钾含量;干灰化处理后,测定全钙含量。

1.4 统计分析

利用 Excel 2016 及 SAS 9.3 进行数据分析。肥效分析采用 Mixed 程序^[10],Reml 法估计方差分量、Satterthwaite 法计算自由度。由于生长性状的单株遗传力不高^[11],本文在研究施肥对株高等增长的效应时,为了消除本底生长对肥效反应的干扰,忽略了副区(家系)效应对本底生长的影响进行协方差分析。根据主区为完全随机的裂区设计特点^[12],混合模型中施肥效应、基因型(半同胞家系)效应、施肥与基因型的互作效应以及施肥前的本底株高、胸径或单株材积为固定效应,主区的重复效应为随机效应。采用 Mixed 程序的 Lsmeans 语句估算处理、家系以及处

理×家系的平均值,采用 Tukey 或 Tukey-Kramer 进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 轮伐中期湿地松家系间针叶养分含量的差异
处理前湿地松 22 个半同胞家系针叶中 10 种必需营养元素的含量见表 1。从表 1 可见,该试验点轮伐中期的湿地松养分缺失,10 种元素中只有锌与锰明显高于最小养分浓度标准^[2]。磷含量严重不足,22 个家系的 $w(P)$ 均低于 $0.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;氮含量偏低,只有家系 9 与 22 的 $w(N)$ 大于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。11 个家系的 $w(K)$ 低于 $2.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。钙的含量除了 5 个家系略偏低外,其他均超过标准[$w_{\text{标准}}(\text{Ca})$ 为 $0.8\sim1.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$],其中。家系间养分含量的变异系数(CV)总体不高,硫与铜的 CV 相对偏高,分别为 21.5% 和 19.53%;其次是钾、钙、锰,CV 分别为 12.68%、14.13% 和 13.31%;其他 5 种元素的 CV 均在 10% 以下。

表 1 湿地松 22 个半同胞家系处理前针叶的养分含量¹⁾
Tab.1 The nutrient concents in the needles of 22 *Pinus elliottii* families before treatment

家系	$w/(g\cdot kg^{-1})$						$w/(mg\cdot kg^{-1})$			
	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Mn	B
1	8.71	0.52	2.20	1.51	0.63	0.64	51.3	3.8	111.0	14.0
2	8.95	0.55	2.27	1.96	0.53	0.42	57.9	4.5	102.0	14.7
3	8.46	0.51	2.75	1.37	0.60	0.60	47.6	4.5	100.0	17.6
4	9.54	0.58	2.96	1.40	0.52	0.74	51.7	4.6	90.6	16.7
5	9.60	0.63	2.00	1.40	0.55	0.56	44.9	3.4	106.0	17.4
6	9.82	0.59	2.79	1.35	0.54	0.38	51.8	2.3	82.2	16.6
7	7.72	0.54	2.35	1.32	0.55	0.81	45.6	4.0	101.0	14.3
8	8.87	0.54	2.67	1.05	0.56	0.65	44.6	5.5	81.2	16.5
9	10.30	0.53	2.16	1.18	0.52	0.83	42.6	3.7	87.9	13.6
10	8.99	0.55	2.39	1.23	0.48	0.46	48.9	4.2	81.7	14.4
11	8.72	0.69	3.00	1.21	0.51	0.64	46.0	3.7	87.0	16.3
12	8.16	0.48	2.24	1.37	0.57	0.64	41.3	3.3	114.0	13.6
13	9.59	0.55	3.32	1.45	0.67	0.84	54.0	3.8	98.3	15.0
14	9.39	0.60	2.50	1.18	0.56	0.79	50.8	4.4	99.9	16.2
15	9.20	0.52	2.50	1.50	0.63	0.59	45.1	3.1	107.0	18.0
16	8.66	0.47	2.60	1.37	0.58	0.44	49.6	2.9	124.0	15.0
17	8.63	0.59	2.86	1.34	0.66	0.57	52.5	3.2	112.0	17.4
18	8.92	0.58	2.60	1.31	0.55	0.51	45.7	3.9	103.0	18.1
19	8.45	0.62	2.48	1.16	0.54	0.66	43.9	3.4	89.0	15.9
20	8.26	0.56	2.29	1.11	0.55	0.64	41.9	3.3	99.8	14.3
21	9.37	0.58	2.44	1.41	0.64	0.76	51.2	2.7	129.0	14.9
22	10.30	0.54	2.26	1.57	0.64	0.54	50.0	4.4	118.0	16.7
平均值	9.03	0.56	2.53	1.35	0.57	0.62	48.1	3.8	101.1	15.8
CV/%	7.37	8.94	12.68	14.13	9.19	21.50	8.97	19.53	13.31	9.21

1) 湿地松的最小养分质量分数:N、P、K、Ca、Mg、S 分别为 10、0.9、2.5~3.0、0.8~1.2、0.6、0.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,Zn、Cu、Mn、B 分别为 10~20、1.5~3.0、20~40、15~35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[2]。

2.2 处理间土壤和针叶养分含量的差异

处理 1 年后,比较 3 个处理的土壤化学性质,结果(表 2)显示,钙镁磷肥与石灰施入 1 年后,土壤 pH、有效磷浓度和交换性钙浓度有所提高,但由于个体差异大,方差分析结果均未达到显著水平。

表 2 不同处理湿地松试验林下的土壤化学性质¹⁾

Tab.2 Chemical characteristics of soil under *Pinus elliottii* experimental forests of different treatments

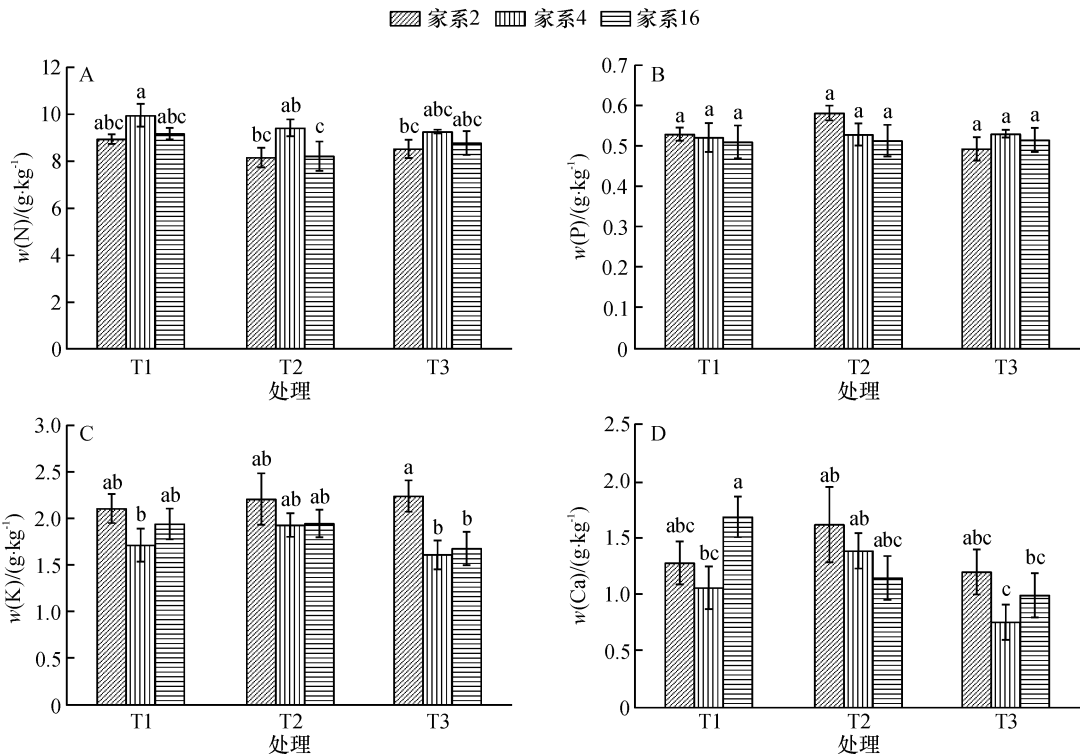
处理	pH	$w/(g \cdot kg^{-1})$			
		有机质	全氮	全磷	全钾
T1	4.09 ± 0.12	19.78 ± 4.17	0.79 ± 0.11	0.32 ± 0.02	1.70 ± 0.18
T2	4.30 ± 0.07	21.08 ± 2.23	0.81 ± 0.04	0.35 ± 0.07	1.61 ± 0.16
T3	4.31 ± 0.11	21.43 ± 4.68	0.88 ± 0.18	0.34 ± 0.02	1.94 ± 0.28

处理	阳离子交换量/ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	$w/(mg \cdot kg^{-1})$			
		碱解氮	有效磷	速效钾	交换性钙
T1	5.29 ± 0.33	76.22 ± 1.10	0.53 ± 0.22	16.37 ± 6.12	17.04 ± 8.13
T2	5.17 ± 0.17	66.87 ± 3.34	3.17 ± 2.16	16.54 ± 8.24	59.51 ± 31.50
T3	5.86 ± 0.12	77.46 ± 11.93	1.72 ± 0.63	18.27 ± 11.32	79.64 ± 37.64

1) T1(对照):氮钾肥, T2:氮钾肥 + 钙镁磷肥, T3:氮钾肥 + 石灰;相同指标不同处理间差异均不显著($P > 0.05$, Tukey 法)。

3 个处理家系 2、4 和 16 针叶的养分含量结果(图 1)表明,钙镁磷肥与石灰处理均不能提高针叶中 N、P、K 和 Ca 含量。石灰处理后,钙含量总体有所下降,且家系 16 针叶中 Ca 含量与 NK 处理的差异

达到显著水平,表明石灰处理不能促进钙的吸收。另外,3 个家系在钙镁磷肥处理下的 N 含量、在石灰处理下的 K 含量存在显著性差异。



T1(对照):氮钾肥, T2:氮钾肥 + 钙镁磷肥, T3:氮钾肥 + 石灰;相同指标柱上凡有一个相同小写字母者,表示差异不显著($P > 0.05$, Tukey 法)。

图 1 不同处理的湿地松家系针叶养分含量

Fig.1 The nutrient contents in the needles of *Pinus elliottii* families under different treatments

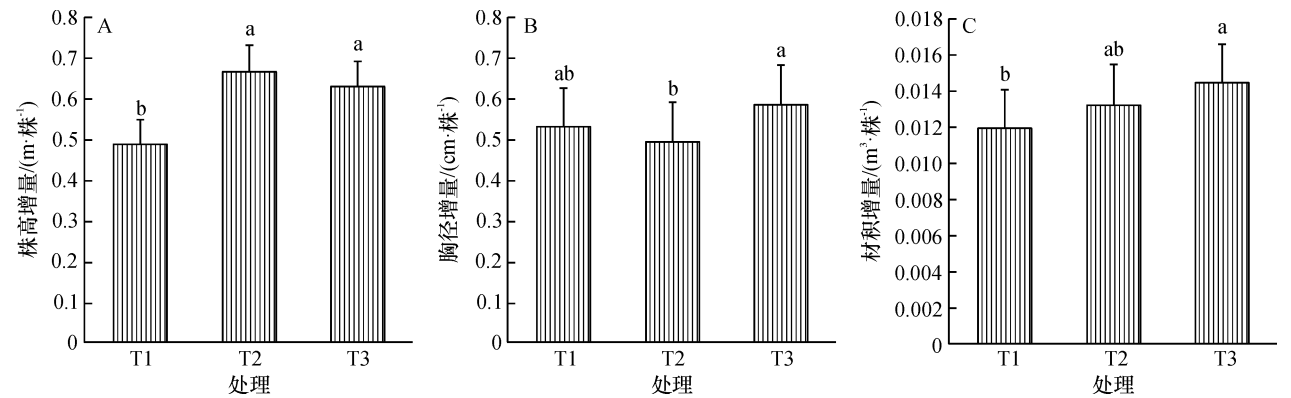
2.3 处理间单株生长的差异

施肥 1 年后,轮伐中期不同的施肥处理对湿地松株高、胸径和材积的增长有显著或极显著影响(表 3)。家系对材积的增量效应显著,而处理与家系互作对株高、胸径和材积的增量效应均不显著。另外,胸径与材积的本底值对自身的增量效应极显著,应作为协变量进行协方差分析。多重比较结果(图 2)

表 3 施肥处理、家系及其互作对湿地松株高、胸径和材积增量的影响

Tab.3 Effects of fertilization treatment, family and their interaction on the increments of height, DBH and stem volume of *Pinus elliottii*

变异来源	自由度	株高增量		胸径增量		材积增量	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
施肥	2	7.97	0.000 4	3.16	0.043 1	5.16	0.006 0
本底值	1	0.12	0.726 2	62.88	<0.000 1	247.56	<0.000 1
家系	21	1.48	0.076 8	1.28	0.180 4	1.92	0.008 6
施肥×家系	42	0.87	0.702 1	0.77	0.846 0	0.81	0.802 5



T1(对照):氮钾肥, T2:氮钾肥 + 钙镁磷肥, T3:氮钾肥 + 石灰;相同指标柱上凡有一个相同小写字母者,表示不同处理间差异不显著($P > 0.05$, Tukey 法)。

图 2 不同施肥处理对湿地松株高和胸径材积增量的影响

Fig.2 Effects of fertilization treatments on the increments of height, DBH and stem volume of *Pinus elliottii*

3 讨论与结论

湿地松轮伐中期,不同施肥处理对湿地松生长有显著影响,与氮钾对照相比,1 年试验期内石灰处理下的材积增量可提高 22.5%,表明研究湿地松轮伐中期的施肥配方有重要经济价值。本研究中施肥处理与家系的互作效应不显著,表明轮伐中期的施肥配方不影响自由授粉子代优良家系以生长为目标性状的选择。

试验林地为酸性红壤,土壤有效磷极度缺乏,加入钙镁磷肥或石灰后,有效磷和交换性钙均有升高的趋势,表明二者在试验期内对酸性红壤的改良有一定效果。与前人制定的最小养分水平^[2]比较,参试的 22 个湿地松家系针叶中磷含量均严重不足。分析其中 3 个家系施肥处理后的针叶养分含量,结

果表明,3 种施肥处理的针叶磷含量无显著差异,这可能是因为磷在植物体内运转具有顶端优势,轮伐中期,植物中的磷可能优先供给新芽、根尖等生长点及球果、种子等生殖器官^[13]。22 个家系针叶中钙含量总体可达最小养分水平(0.8~1.2 g·kg⁻¹),施加钙镁磷肥或石灰均不能增加针叶中钙含量,相反,石灰处理的针叶中钙含量有下降趋势,且在家系 16 中达到显著水平。这可能与个体差异有关,也可能暗示了该试验林地土壤中钙含量相对充足^[9],施钙不能促进钙的吸收和体内运转,但生长的加快引起了钙养分的稀释。因此,石灰处理下生长的促进效果可能与钙无关,但是否与磷有关还需进一步验证。

钙镁磷肥能显著提高株高增量,说明磷与湿地松株高生长有密切关系。钙镁磷肥和石灰均不能提高胸径增量,但石灰处理下的胸径增量高于钙镁磷

肥处理,暗示磷、钙以外的养分调控了胸径生长,而且该养分可能与磷的吸收存在竞争关系。

本文对湿地松 22 个家系进行了针叶养分测定,与前人报道的最小养分水平^[2]相比,只有锌与锰绝对充足,而后续研究也表明,钙可能与中期生长无关。今后开展湿地松轮伐中期追肥研究应注意 N、P、K、Mg、S 与 B 的施入。针叶中钾含量的变异系数中等,家系 2、4 和 16 的针叶中钾含量存在显著差异,表明湿地松对钾的吸收或运转机制存在基因型差异,今后开展湿地松钾养分效率的研究应考虑家系间的差异。

国外松人工林成熟期一般为 20 年以上^[14],我国木材缺口较大,对于一些经营强度高的林分,湿地松的主伐年龄缩短至 15 年^[15]。因此,对于 10 年生以上林分的施肥研究在我国相对较少。本文研究结果表明,石灰处理对株高和材积增长有显著促进作用,湿地松人工林轮伐中期后可考虑追施氮钾 + 石灰以提高出材量。

参考文献:

[1] 潘志刚,游应天. 中国主要外来树种引种栽培[M]. 北京:科学技术出版社,1994: 41-42.

[2] JOKELA E J. Nutrient management of southern pines [C]//DICKENS E D, BARNETT J P, HUBBARD W G, et al. Slash pine: Still growing and growing! Proceedings of the slash pine symposium. Asheville, N C: USDA Forest Service, Southern Research Station, 2004:27-35.

[3] FOX T R, ALLEN H L, ALBAUGH T J, et al. Forest fertilization in southern pine plantations[J]. Better Crops, 2006,90(3): 12-15.

[4] XU Z H, SIMPSON J A, OSBORNE D O. Mineral nutrition of slash pine in subtropical Australia: I: Stand growth response to fertilization[J]. Fert Res, 1995,41(2): 93-

100.

[5] 陈启基,潘文,邓琳琳,等. 滨海沙地湿地松中龄林施肥效应的研究[J]. 广东林业科技, 1995,11(4): 49-52.

[6] KYLE K H, ANDREWS L J, FOX T R, et al. Long-term impact of drainage, bedding, and fertilization on growth of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in the coastal plain of Virginia[J]. South J Appl For, 2005, 29(4): 205-214.

[7] WEI R P, YANG R C, WEI Q W, Effect of lime application to acidic soils on oleoresin yield tapped from pine plantations in South China[J]. Open J For, 2014 (4):390-397

[8] HEPLER P K. Calcium: A central regulator of plant growth and development[J]. Plant Cell, 2005, 17(8): 2142-2155.

[9] WEST P W. Tree and forest measurement [M]. New York: Springer, 2009:18.

[10] LITTELL R C, MILLIKEN G A, STROUP W W, et al. SAS® for mixed models [M]. 2 ed. Cary, N C: SAS Institute Inc., 2006: 286-297.

[11] 赵奋成,林昌明,吴惠姗,等. 湿地松生长性状遗传参数的年度变化趋势[J]. 广东林业科技, 2015, 31(5): 1-7.

[12] Statistical Consulting Group. Newtest: Command to compute new test [EB/OL]. [2016-04-01]. <http://www.ats.ucla.edu/stat/stata/ado/analysis/>.

[13] 廖红,严小龙. 高级植物营养学[M]. 北京:科学出版社, 2003:140.

[14] 栾启福,李彦杰,姜景民. 国外松种间杂交后代生长和形态性状变异及相关性分析[J]. 植物研究, 2014, 34 (1):95-102.

[15] 国家林业局. 速生丰产用材林培育技术规程: LY/T 1706-2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007:7.

【责任编辑 周志红】